

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Problematika přesnosti frézování
nakloněným nástrojem**

Accuracy in Milling with Inclination Tool Axis

Student:

Tomáš Zbránek

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Zbránek**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Problematika přesnosti frézování nakloněným nástrojem**
Accuracy in Milling with Inclination Tool Axis

Zásady pro vypracování:

1. Přehled současného stavu frézování tvarových ploch.
2. Problematika přesnosti při obrábění.
3. Vliv náklonu nástroje na přesnost obrábění.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] SADÍLEK, M. *Zvyšování efektivnosti obrábění s využitím CAD/CAM systému-Disertační práce*. Ostrava : Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 123 stran, 23 příloh.
- [2] CHEN, J. S.; HUANG, Y. K.; CHEN, M. S. A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005) p. 1077–1084, 2005.
- [3] JANDA, Z.; FULEMOVÁ, J.; ŘEHOŘ, J. Geometrická přesnost a řezné síly při tvarovém HSC frézování v závislosti na změně záběru, *Sborník přednášek vzdělávání, výzkum, inovace*. FS, VŠB-TU Ostrava, Mezinárodní konference mladých výzkumníků a doktorandů. ERIN 2008. s. 69, 2008. ISBN 978-80-248-1982-2.
- [4] KOCMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno. 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011


doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:
23.5.2011

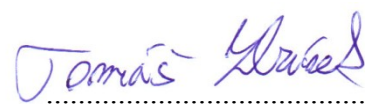
.....


Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 23.5.2011


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Tomáš Zbránek

Adresa trvalého pobytu autora práce: K.H.Máchy 18, 787 01 Šumperk

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ZBRÁNEK, T. *Problematika přesnosti frézování nakloněným nástrojem: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2010, 39 s, Vedoucí práce: Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Tato bakalářská práce si klade za cíl seznámit čtenáře podrobněji s problematikou frézování nakloněným nástrojem (kulovou frézou), přičemž se zaměřuje především na aspekty ovlivňující přesnost obrobené plochy. Čtenář je postupně seznámen se současnými trendy v obrábění tvarových ploch, problematikou měření přesnosti a nakonec i s aspekty ovlivňující přesnost obrobené plochy, mezi které patří především síly řezání a jejich vliv na stabilitu a chvění nástroje. Na základě dostupných odborných textů je srovnána přesnost obrábění při použití tříosé a pětiosé technologie frézování a různých úhlů sklonu. V závěru jsou vyhodnoceny získané poznatky a uvedena doporučení pro praxi.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

ZBRÁNEK, T. *Accuracy in Milling with Inclination Tool Axis: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2010, 39 p, Thesis head: Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

This bachelor thesis aims to familiarize readers with the issue milling with inclined milling tool (ball-end mill), focusing mainly on aspects that affect the accuracy of machined surfaces. The reader is introduced with current trends in the milling of contoured surface, the measurement accuracy, and finally with aspects influencing the precision machined surfaces, including cutting forces and their influence on milling tool stability and vibrations. Based on available scientific texts are compared precision of machining of three-axis and five-axis milling technology and different values of tool inclination. In conclusion, the lessons learned are evaluated and gives recommendations for practice use.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	7
1. Úvod.....	9
2. Frézování tvarových ploch	10
2.1 Třískové metody frézování tvarových ploch	10
2.2 Beztřískové metody frézování tvarových ploch	11
2.3 Využití pětiosých obráběcích center	11
2.4 Výhody naklonění nástroje	12
2.5 Drsnost povrchu při frézování nakloněným nástrojem.....	14
3. Problematika přesnosti při obrábění.....	16
3.1 Měření rozměrové přesnosti tvarových ploch	17
3.2 Aspekty ovlivňující přesnost	18
4. Vliv naklonění nástroje na přesnost povrchu	22
4.1 Síly řezání při náklonu nástroje	23
4.1.1 Složky sil řezání	23
4.1.2 Experimentální měření sil řezání při náklonu nástroje	24
4.2 Rozdíly v přesnosti mezi tříosým a pětiosým frézováním	30
4.3 Změna přesnosti při měnícím se úhlu sklonu	32
4.4 Shrnutí získaných poznatků.....	35
5. Závěr.....	37
6. Použitá literatura.....	39

Seznam použitých zkratk a symbolů

Značení	Význam	Jednotka
CAD	počítačem podporovaný návrh	[-]
CAM	počítačem podporovaná výroba	[-]
CNC	číslicově řízený stroj	[-]
HO	horizontální řádkování	[-]
NaCl	chlorid sodný	[-]
NaClO ₃	chllorečnan sodný	[-]
NaNO ₃	dusičnan sodný	[-]
NC	číslicově řízený	[-]
SMS	souřadnicové měřicí stroje	[-]
TA	tažený nástroj	[-]
TL	tlačený nástroj	[-]
A	průřez třísky	[mm ²]
a _e	šířka řezu	[mm]
a _p	hloubka řezu	[mm]
d	průměr frézy	[mm]
d _{eff}	efektivní průměr frézy	[mm]
e	excentricita	[mm]
F	celková síla	[N]
F _c	síla řezání	[N]
F _{cN}	normálová síla řezání	[N]
F _f	posuvová síla	[N]
F _{fN}	normálová posuvová síla	[N]
F _a	aktivní složka celkové síly F	[N]
F _p	pasivní složka celkové síly F	[N]
F _e	pracovní síla	[N]
F _{eN}	normálová pracovní síla	[N]
F _x , F _{xM}	složka síly řezání v ose X	[N]
F _y , F _{yM}	složka síly řezání v ose Y	[N]
F _z , F _{zM}	složka síly řezání v ose Z	[N]
f	posuv	[mm]
f _n	posuv na otáčku	[mm]
f _z	posuv na zub	[mm]
L ³ /D ⁴	parametr štíhlosti	[-]
n	otáčky frézy	[min ⁻¹]
o	uvažovaný bod ostří	[-]
R	poloměr zaoblení ostří	[mm]

r	poloměr kuličky dotykového hrotu	[mm]
R_a	průměrná aritmetická odchylky profilu nerovnosti	[μm]
R_z	největší výška profilu nerovnosti	[μm]
t_0	nedeformovaná tloušťka třísky	[mm]
T_n	trvanlivost nástroje	[min]
v_c	řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
v_{ceff}	efektivní řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
β_f	úhel sklonu nástroje	[°]
β_n	úhel sklonu nástroje	[°]
δ	úhel sklonu nástroje	[°]
Δa_e	interval šířky řezu	[mm]
ψ_e	poziční úhel	[°]

1. Úvod

Technologie obrábění prošla v několika posledních desetiletích rychlým vývojem. Byla vyvinuta moderní pětiosá obráběcí centra umožňující nám obrobit prakticky jakékoliv tvary a plochy. Neustále vznikají kvalitnější nástroje vyrobené ze špičkových materiálů, umožňující nám použití vyšších řezných rychlostí a otáček. Vývojem prošly i CAD/CAM systémy, díky kterým jsme schopni naprogramovat obráběcí postupy i pro tvarově složité součásti, jakými jsou lisovací formy či kovací zápustky. Spojením výkonných obráběcích center, kvalitních nástrojů a stále dokonalejších CAD/CAM systémů můžeme zavést takové obráběcí postupy, jenž by dříve nebyly možné.

Jedním z nich je i frézování s využitím náklonu nástroje (kulové frézy), které je možné především díky existenci pětiosých obráběcích center. I přej zjevné výhody náklonu nástroje, není tato metoda příliš často využívána v praxi. Jedním z důvodů může být i to, že nejde o zcela prozkoumanou oblast a netěší se tak velké pozornosti ze strany odborných kruhů, existují však i výjimky. Vedoucí této bakalářské práce, pan Ing. Marek Sadílek, Ph.D., popsal ve své disertační práci a v článcích měsíčníku MM Průmyslové spektrum přednosti náklonu nástroje. [5, 7, 8]. Realizoval rovněž praktické experimenty, kde zjišťoval vliv úhlu náklonu na drsnost povrchu. Tato bakalářská práce si klade za cíl na základě dosud získaných poznatků zjistit, jak náklon nástroje ovlivňuje přesnost obrobené plochy. Praktické experimenty na toto téma by však vyžadovaly špičkové strojní vybavení zahrnující moderní pětiosé obráběcí centrum a velmi kvalitní měřicí zařízení. Vyhodnocení získaných výsledků by pak náročností a rozsahem bylo vhodnější spíše pro diplomovou práci. I proto je tato práce spíše návodem, který snad bude prospěšný pro zrealizování podobných experimentů v budoucnu.

Hned několik zahraničních autorů publikovalo články týkající se frézování nakloněnou kulovou frézou [14, 15, 16, 17, 18, 24]. S jejich přispěním tak můžeme v této práci popsat, jakými postupy lze stanovit velikost i orientaci sil řezání a vyhodnotit míru chvění nástroje při obrábění. Oba tyto aspekty mají největší vliv na rozměrovou přesnost obrobku a na kvalitu povrchu, proto jim budeme věnovat nejvíce prostoru. Dále zhodnotíme výsledky praktických experimentů, které srovnávaly přesnost obrobené plochy vyrobené pětiosým a tříosým frézováním a s různými úhly sklonu. V závěru jsou na základě získaných poznatků uvedena doporučení pro praxi.

2. Frézování tvarových ploch

Existuje několik metod frézování tvarových ploch, přičemž se dají rozdělit na konvenční (třískové) a nekonvenční (beztrískové). Mezi nekonvenční metody frézování můžeme zařadit elektroerozivní či elektrochemické obrábění, pro účely této práce jsou však nejpodstatnější metody třískové, proto se nekonvenčním metodám budeme věnovat jen krátce. Třískové frézování pak můžeme dělit na ručně vedené, kopírovací a NC frézování.

2.1 Třískové metody frézování tvarových ploch

Za nejstarší metodu lze považovat ručně vedené frézování. Tento dnes již nepoužívaný způsob frézování byl založen na ruční manipulaci obsluhy, která kombinovala příčný a podélný posuv. Geometrie obráběné plochy byla uchovávána na výkrese a s použitím šablon se přerýsovala na polotovar. Obsluha obráběla ručně, nebo s použitím hydraulické podpory. Nejčastěji se používala řádkovací strategie, která spočívá v odběru souměrných vrstev materiálu po celém obvodu. Nevýhodou ručního vedení byla nízká přesnost a nepoužitelnost pro automatizovanou výrobu.

Kopírovací frézování nám umožňuje výrobu částečně automatizovat. Princip metody spočívá v přenosu tvaru z fyzického modelu přes dotykový hrot pomocí elektro-mechanické nebo hydraulicko-mechanické vazby na frézovací nástroj v reálném čase. Stroj využívaný u této metody se nazýval pantograf. Modely bývaly někdy i několikanásobně větší než skutečná součást a to proto, aby se zamezilo zbytečné nepřesnosti. Většinou se frézovalo na dvě etapy. V první etapě tzv. hrubovací řízení procesu realizoval kvalifikovaný dělník zpravidla rukou, kterou vedl dotykový hrot a v druhé etapě tzv. dokončovací (na čisto), je řízení procesu realizované automatizovaně na základě postupu kopírovacího frézování, která je většinou orientována vrstevnicově. Podstatnou nevýhodou tohoto způsobu je zpětná vazba od procesních sil na dotykový hrot. Některé nedostatky nám kompenzuje metoda elektronického kopírovacího frézování. Při této metodě se využívá přerušení vazby mezi dotykem a výrobním procesem neboli přesněji přímým obráběním. Díky tomu dochází ke zlepšení přesnosti vyráběných součástí a výraznější reprodukovatelnosti oproti klasickému kopírovacímu frézování.

NC frézování prezentuje nejmodernější a v současné době i nejpoužívanější způsob frézování tvarových ploch s využitím CAD/CAM systémů. U této metody jsou geometrické informace matematicky popsány formou ploch či objemových modelů, samozřejmě s využitím výpočetní techniky. Díky CAM části propojené se systémem je takto matematicky popsáný model obroben v počítačové simulaci, která zároveň generuje dráhy nástroje a následně převede do jazyka NC – řízeného stroje. Mezi hlavní výhody patří vysoká přesnost či snadná aplikace změn a úprav. Nevýhodou je pak nutnost kvalifikovaných pracovníků a vyšší finanční nároky na stroje i software. [3]

2.2 Beztřískové metody frézování tvarových ploch

Elektroerozivní obrábění se uplatňuje především při výrobě vstřikovacích forem na plasty, střižných a lisovacích nástrojů a v neposlední řadě při obrábění problematicky obrobitelných kovů. Podmínkou pro použití tohoto druhu obrábění je elektrická vodivost materiálu. Samotný princip lze popsat tak, že při vzájemném přiblížení obrobku a nástroje - elektrody, na který je přivedeno elektrické napětí - dochází k elektrickému výboji, který způsobuje roztavení mikroskopických částeczek materiálu obrobku a díky jejich následnému vyplavení a odstranění z prostoru obrábění dochází k opracování obrobku do požadovaného tvaru či rozměru.

Při elektrochemickém obrábění je obrobek (anoda) je ponořen do elektrolytu a dochází na něm k reakci, při níž se kationty elektrolytu slučují s anionty kovu na povrchu anody a postupně ubírají kov z anody. Anoda kopíruje tvar katody (nástrojové elektrody). Jako elektrolyt se používá NaCl, NaNO₃, NaClO₃ a další. [1, 2]

2.3 Využití pětiosých obráběcích center

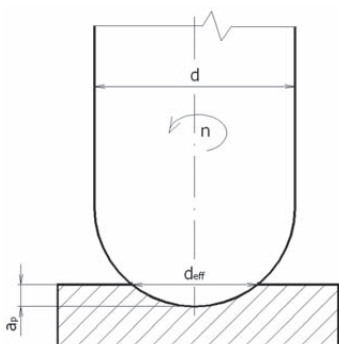
Moderní pětiosá obráběcí centra se výborně hodí pro výrobu tvarově složitých součástí. Pětiosá technologie umožňuje přesné obrábění složitých trojrozměrných obrysů. Motorová vřetena dovolují vzhledem k točivému momentu optimalizované a tudíž hospodárné použití příslušného frézovacího nebo vrtacího nástroje pro nejjemnější obrábění nebo frézovací hlavy k výkonovému hrubování. Statická a dynamická stabilita obráběcích center dnes umožňuje i racionální obrábění kalených materiálů načisto. Dynamické pohony os umožňují ve spojení s

řízením, softwarem a NC programem, spolu s použitým obráběcím nástrojem a chladicím mazivem a při sladění řezných parametrů velice přesné polohování, dodržení přesnosti technologického postupu a tudíž vysokou přesnost a kvalitu povrchu. Díky těmto vlastnostem jsou pětiosá obráběcí centra přímo předurčena pro frézování nakloněným nástrojem. Spojení těchto moderních obráběcích strojů a výkonných CAD/CAM systémů umožňuje naplno využít výhod náklonu kulové frézy při obrábění tvarových ploch. [4, 5, 6]

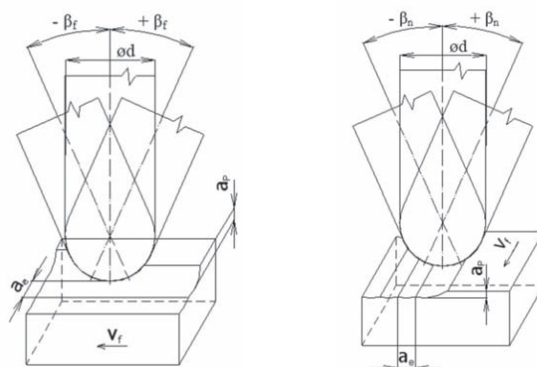
2.4 Výhody naklonění nástroje

Při klasickém frézování kulovou frézou svírá nástroj a obrobek pravý úhel, jehož důsledkem je nulová řezná rychlost na kulovém ostří v ose nástroje. V tomto bodě nedochází k úběru třísky a nástroj pouze zatlačuje materiál obrobku. Nulová řezná rychlost a zatlačování materiálu způsobují další nežádoucí jevy jako je přechování třísky, zvyšování teploty řezání nebo častější tvorba nárůstků. Všechny tyto jevy mají nežádoucí vliv na kvalitu obrobeného povrchu a trvanlivost nástroje, avšak lze je eliminovat naklopením nástroje o vhodně zvolený úhel.

Náklon nástroje oproti normále k povrchu ve směru posuvu způsobuje vznik mírného normálového napětí. Náklon kolmý na směr posuvu vyvolává útlum samobuzených kmitů a má tedy stabilizující účinky. Na obrázku č. 2.1 je znázorněna poloha nástroje u tříosého obráběcího centra, kde není možnost naklonění vřetena, úhel náklonu $\beta_n(f)$ je tedy roven nule. Důsledkem je podstatně nižší efektivní průměr frézy d_{eff} , zvláště při malých hloubkách řezu a_p , a s tím současně i efektivní řezná rychlost. Na obrázku č. 2.2 jsou zobrazeny možnosti naklonění nástroje vůči normále k povrchu ve směru posuvu a ve směru kolmém na posuv. [5]



Obr. 2.1. Kulová fréza bez
náklonu [5]



Obr. 2.2. Možnosti náklonu
nástroje [5]

Po naklonění nástroje se efektivní průměr frézy zvýší a s ním i efektivní řezná rychlost. To se kladně projeví na jakosti obrobeného povrchu i trvanlivosti nástroje. Efektivní průměr frézy bez náklonu nástroje lze vypočítat pomocí vzorce:

$$d_{eff} = 2 \cdot \sqrt{a_p (d - a_p)} [mm] \quad (2.4.1)$$

a_p axiální přísuv nástroje (hloubka řezu) [mm]

d průměr frézy [mm]

Důležitou roli hraje i směr posuvu nástroje. Tažený posuv se oproti tlačnému vyznačuje tišším chodem a lepší kvalitou povrchu. Tyto dva způsoby mohou být použity jak u naklopení ve směru posuvu, tak u naklopení kolmém na směr posuvu. Upravené vzorce pro výpočet efektivního průměru frézy při náklonu nástroje:

Tažený nástroj:

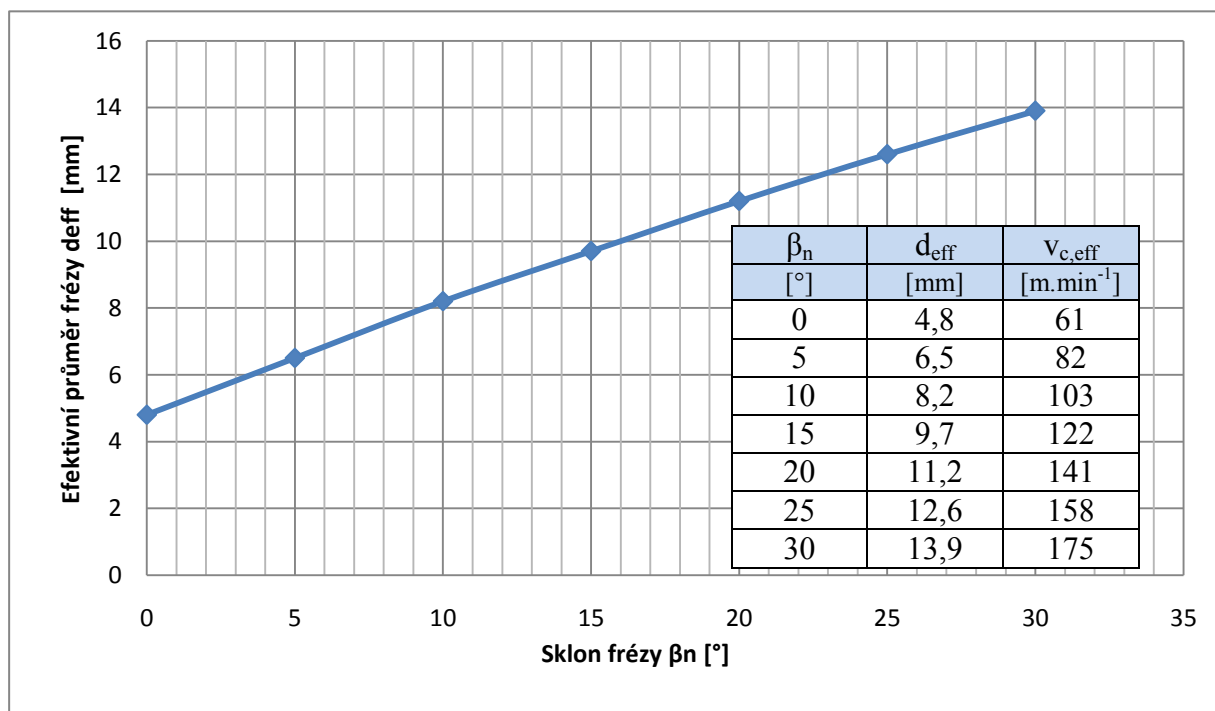
$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{d - 2a_p}{d} \right) + \beta_f \right] [mm] \quad (2.4.2)$$

Tlačný nástroj:

$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{d - 2a_p}{d} \right) - \beta_f \right] [mm] \quad (2.4.3)$$

β_f náklon nástroje [°]

Také použití sousledného či nesousledného způsobu frézování má na jakost povrchu a životnost nástroje velký vliv. Třiosé obráběcí centrum s možností naklopení čtvrté osy nebo pětiosé obráběcí centrum, u kterého je možné naklonění vřetena v jakémkoliv směru, umožňuje efektivnější frézování při malých průměrech frézy. Závislost velikosti efektivní řezné rychlosti na průměru a úhlu sklonu nástroje je zobrazena na grafu 2.3. Uvedené hodnoty byly naměřeny při použití kulové frézy o průměru $d = 20$ mm, hloubka záběru $a_p = 0,3$ mm, otáčky $n = 4000 \text{ min}^{-1}$. [5]



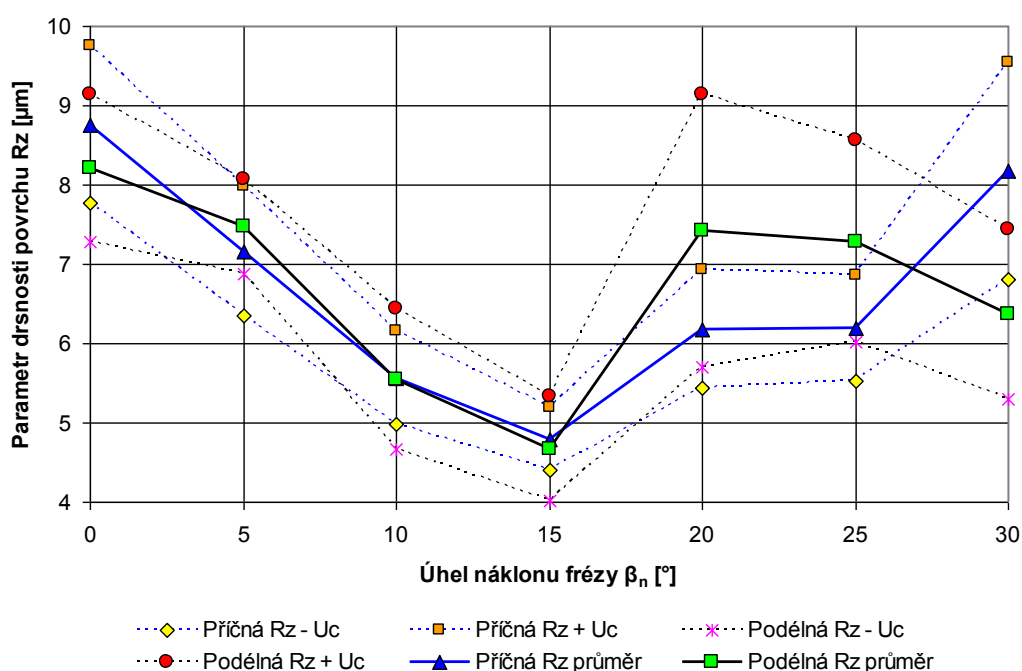
Graf 2.3. Závislost efektivní řezné rychlosti na průměru a úhlu sklonu nástroje [5]

2.5 Drsnost povrchu při frézování nakloněným nástrojem

Drsnost povrchu je jedna z nejdůležitějších součástí hodnocení kvality obrobené plochy. Má velký vliv na životnost a spolehlivost obrobených ploch, únavovou pevnost, míru opotřebení, odolnost proti korozi atd. Je definována jako souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Podle převládajícího směru nerovností se drsnost posuzuje v příčném nebo podélném směru. V praxi je nezbytné dodržet požadovanou hodnotu drsnosti a zajistit tak odpovídající kvalitu výrobku, proto je nutné hledat způsoby pro předpověď drsnosti na základě zvolených řezných parametrů ještě před začátkem samotného obrábění. [7, 9]

Díky realizaci praktických experimentů provedených Ing. Markem Sadílkem, Ph.D. můžeme posoudit, jak velký vliv má velikost úhlu náklonu frézy na drsnost povrchu. Zmíněný experiment byl proveden na frézce FMG, přičemž bylo použito jak sousledné, tak nesousledné frézování. Způsob posuvu byl zvolen jako tažený, neboť je u něj větší efektivní průměr frézy d_{eff} než-li je tomu u způsobu tlačného. Při obrábění byly použity procesní kapaliny, aby se zabránilo tzv. chlupatění, tedy vytrhávání částeczek materiálu z povrchu obrobku.

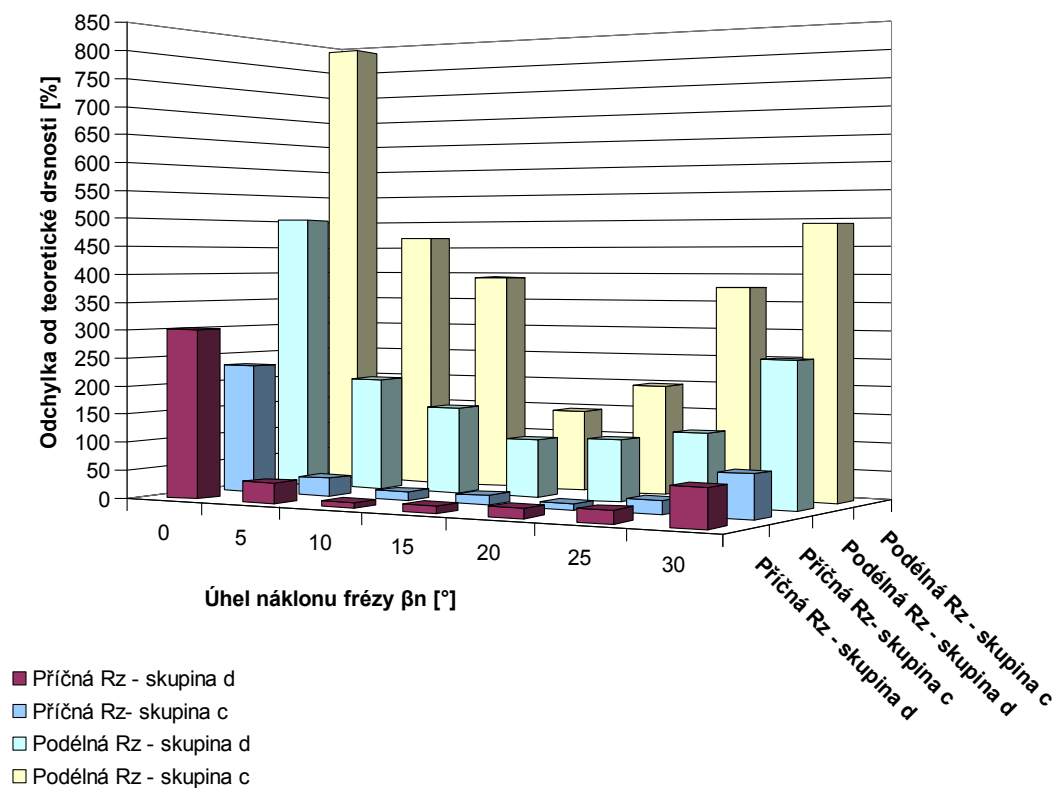
Experiment byl proveden s dvěma frézami o průměru 10 a 20 mm. Výsledky prvního sledovaného průměru můžeme vidět na grafu 2.5.1. Graf obsahuje průběhy příčné a podélné drsnosti značené plnými tlustými čarami. Tečkované čáry vyjadřují rozptyly naměřených hodnot. Z grafu je vidět, že z hlediska drsnosti povrchu se jeví jako nejvhodnější úhel náklonu nástroje $\beta_n = 15^\circ$. U větší šířky řezu a posuvu na zub bylo dosaženo menších odchylek drsnosti. Z testů vyplývá, že vhodným náklonem nástroje lze docílit zlepšení drsnosti R_z až o 130% a R_a až o 50%. Při náklonu větším než 15° drsnost opět roste, přičemž příčinou může být změna geometrie břitové destičky, kde dochází k řezání mimo přechodové ostří.



Graf. 2.5.1. Závislost drsnosti na úhlu sklonu frézy o průměru $d = 10$ mm [6]

Výsledky testování frézy o průměru $d = 20$ mm jsou zobrazeny v grafu 2.5.2. Na tomto grafu jsou porovnávány hodnoty R_z u podélných a příčných drsností při zachování stejné šířky řezu ($a_e = 0,499$ mm) ale pro různé posuvy na zub ($f_z = 0,25$ a $0,553$ mm). Ze vzájemného srovnání vyplývá, že ve směru podélné drsnosti bylo u většího posuvu na zub dosaženo menších odchylek drsnosti. Pro stejné a_e a různé f_z vzrostla příčná drsnost u frézování bez využití náklonu nástroje, s náklonem se však příčná drsnost nijak zásadně neměnila. V tomto případě se jako nejvhodnější úhel náklonu jeví rovněž $\beta_n = 15^\circ$, u vyššího posuvu pak $\beta_n = 10^\circ$. U větších hodnot náklonu se opět negativně projeví změna geometrie břitové

destičky a drsnost tedy roste. Z výsledků je patrné, že náklon nástroje má výrazný vliv na snížení příčné i podélné drsnosti. [7, 8]



Graf. 2.5.2. Odchylky od teoretické drsnosti R_z při náklonu frézy $d = 20$ mm [6]

3. Problematika přesnosti při obrábění

Rozměrová a tvarová přesnost obrobenej plochy je nezbytnou podmínkou každého výrobního procesu, proto je v praxi kladen velký důraz na její efektivní a spolehlivé ověření. Pokud budeme brát v úvahu jen tvarové plochy, které jsou vzhledem k tématu této práce nejdůležitější, jeví se jako nejvhodnější použití souřadnicových měřicích strojů (SMS). Ve srovnání s tradičními způsoby měření, kde odečítání naměřených hodnot z jemných stupnic je nejen zdlouhavé, ale i namáhavé, představuje číslicový způsob vyhodnocení výsledků u souřadnicových měřicích strojů značný krok vpřed. V následujících dvou kapitolách je popsána funkce těchto měřicích zařízení a zhodnoceny hlavní faktory ovlivňující přesnost obrobenejch ploch.

3.1 Měření rozměrové přesnosti tvarových ploch

Jak už bylo řečeno v úvodu, souřadnicové měřicí stroje představují nejefektivnější způsob měření přesnosti tvarových ploch. Vývoj souřadnicových měřicích strojů byl vynucen potřebou měření karosérií v automobilovém a leteckém průmyslu a potřebou měření u CNC strojů ve strojírenské výrobě. Princip souřadnicového měření spočívá v tom, že stanovíme základní bod v prostoru a polohy dalších bodů na měřené součásti měříme formou souřadnicových rozměrů v osách X, Y, Z. Možnost určení základního bodu v kterémkoliv místě pracovního prostoru měřicího stroje je velkou výhodou oproti konvenčním metodám. SMS kontroluje výrobky podobným způsobem, jako je CNC stroj vyrábí. Pracuje rychle - měřicí časy redukuje asi o 80 %. SMS jsou zvláště vhodné pro rozměrovou kontrolu součástí vyrobených na frézkách, vyvrtáčkách, vrtačkách a obráběcích centrech. SMS ve spojení s počítačovou technikou představuje prostředek pro účinné zvyšování a udržování jakosti ve všech druzích výroby při obrábění i tváření. Kontrola obrobku vyžaduje přípravu měřicího programu, provedení vlastního měření, vyhodnocení měření a protokolování. Měřicí program sleduje geometrické definice a návody pro pohyby, měření a vyhodnocení. Na základě uvedených definic a návodů jsou určovány body měření. Naměřené hodnoty jsou obvykle porovnávány s původním CAD modelem měřené součásti. [10]

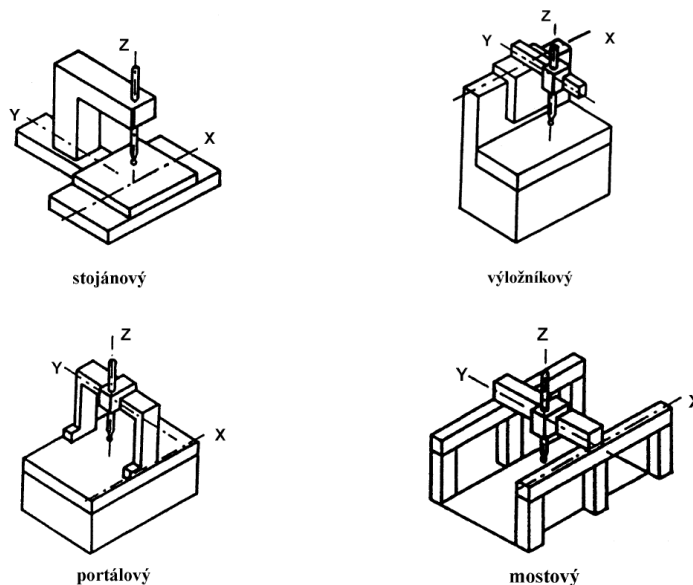
Podle konstrukce můžeme souřadnicové měřicí stroje dělit na stojanové, výložníkové, portálové a mostové. Nákrety jednotlivých druhů konstrukcí jsou zobrazeny na obrázku 3.1.1.

Stojanový typ se vyznačuje se relativně malými rozsahy měření, často jde o laboratorní SMS, kde se při dobré přístupnosti k měřenému objektu dosahuje největší přesnosti.

Výložníkový typ má dobrou přístupnost k měřenému objektu. Z důvodu tuhosti je osa Y poměrně krátká, proto se hodí hlavně pro měření dlouhých součástí.

Portálový typ se používá se převážně pro střední a velké rozsahy. Vyznačuje se dobrou tuhostí, což zajišťuje relativně vysokou přesnost. Vyrábí se s pevným a pohyblivým portálem.

Mostový typ umožňuje největší rozsahy měření (až 24 m). Tuhost konstrukce zajišťují silné nosníky a sloupy. Přesnost měření je z důvodu značné velikosti o něco nižší. Tyto SMS se uplatňují především v leteckém a automobilovém průmyslu, např. při kontrole přesnosti svařovaných karosérií. [11]



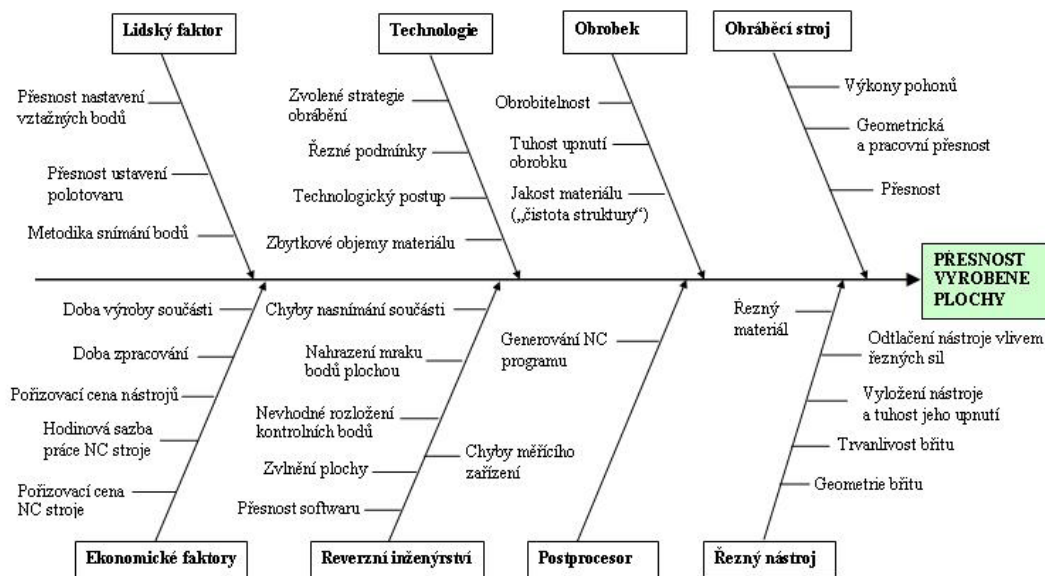
Obr. 3.1.1 Typy souřadnicových měřících strojů [11]

Prvním krokem při měření na SMS je určení polohy snímaného bodu v souřadnicové soustavě měřicího stroje. Tento základní bod je východiskem pro určení vzájemné polohy geometrických prvků, tvořících povrch součásti. Podle tvaru kontrolované součásti se volí pravoúhlá nebo polární souřadnicová měřicí soustava. Počítačová technika s využitím matematických závislostí generuje povrch součásti na základě snímaných bodů a zabezpečuje kontrolu obrobků při minimálním počtu těchto bodů. Vyhodnocování naměřených hodnot a příprava řídicích programů pro CNC ovládané měřicí stroje je založeno na systému geometrických prvků, na které lze rozložit kontrolovanou plochu. Základní neohraničené geometrické prvky pro povrch jsou: přímka, rovina, válcová plocha a kuželová plocha. Ohraničené základní geometrické prvky jsou: bod, úsečka, kruhový oblouk, rovinná ploška, kužel, válec apod., které se lépe hodí pro matematické modelování kontrolovaného povrchu. Tvarové plochy, které nelze rozložit na základní geometrické prvky, se zachytí pomocí vhodně volených bodů v minimálním počtu. [10,11]

3.2 Aspekty ovlivňující přesnost

V následující kapitole krátce zhodnotíme nejdůležitější aspekty, které ovlivňují přesnost a strukturu povrchu. Jak je vidět na obrázku 3.2.1, přesnost může být více či méně ovlivněna celou řadou různých skutečností, ze kterých však vybereme jen ty nejpodstatnější. Budeme se

věnovat řezným podmínkám, strategii frézování, vlastnostem obráběného materiálu a řeznému prostředí. Zde uvedené skutečnosti platí všeobecně pro většinu obráběcích procesů, avšak nestačí k dostatečnému popsání problematiky přesnosti při frézování nakloněným nástrojem. I proto jsou nejdůležitější činitelé ovlivňující přesnost obrobené plochy při frézování s využitím náklonu nástroje podrobně zhodnoceni v samostatných kapitolách 4.1, 4.2 a 4.3.



Obr. 3.2.1 Faktory ovlivňující přesnost obrobené plochy [19]

Řeznými podmínkami se rozumí především řezná rychlost v_c , posuv na zub f_z a šířka záběru ostří a_p . Výpočet těchto parametrů lze provést podle následujících vzorců:

$$\text{Řezná rychlost: } v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3.2.1)$$

d ... průměr frézy [mm]

n ... otáčky nástroje [min^{-1}]

$$\text{Posuv na zub: } f_z = \frac{f_n}{z} \text{ [mm]} \quad (3.2.2)$$

f_n ... posuv na otáčku [mm]

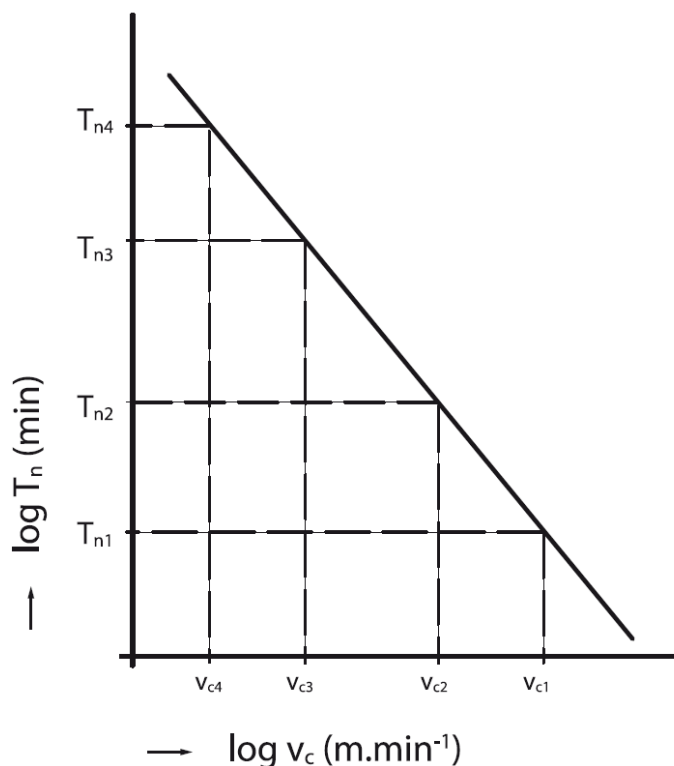
z ... počet zubů [-]

$$\text{Šířka záběru ostří: } a_p = f_z \cdot A \text{ [mm]} \quad (3.2.3)$$

f_z ... posuv na zub [mm]

A ... průřez třísky [mm^2]

Tyto parametry obráběcího procesu volí technolog obvykle podle údajů výrobce nástroje a podle vlastností obráběného materiálu. Kromě vlivu na přesnost a drsnost obrobeného povrchu hrají i důležitou roli při stanovení trvanlivosti nástroje, viz graf 3.2.2.

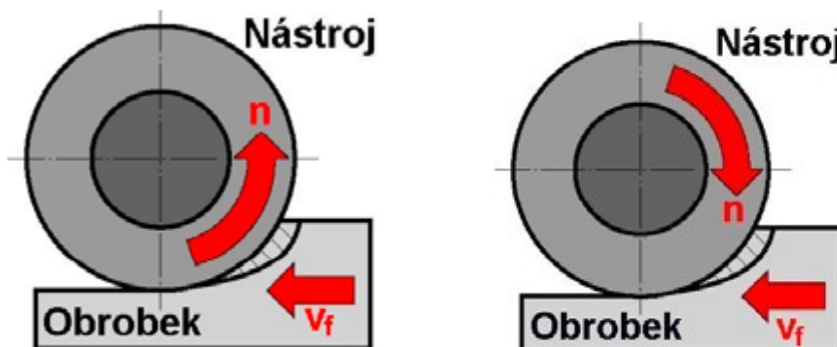


Graf 3.2.2 Závislost trvanlivosti nástroje na řezné rychlosti [22]

Nejzákladnější dělení strategie frézování je na sousledné a nesousledné, viz obrázek 3.2.3. Při nesousledném frézování se ostří rotujícího nástroje v místě styku pohybuje proti směru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Proměnlivá tloušťka třísky se mění od minimální hodnoty na hodnotu maximální. Při vnikání nástroje do materiálu z počátku břit materiál pouze stlačuje. K oddělování třísky dochází v okamžiku, kdy tloušťka odřezávané vrstvy dosáhne určité velikosti. Důvodem je skutečnost, že ostří frézy nemůže být ostrá hrana, ale ploška o poloměru cca $R = 8$ až $30 \mu\text{m}$. Silové účinky a deformace, vznikající při nesousledném frézování, způsobují zvýšené opotřebení břitu a zhoršenou kvalitu povrchu.

Při sousledném frézování je smysl rotace takový, že ostří se v místě styku pohybuje ve směru posuvu obrobku. Tloušťka třísky se mění z maximální hodnoty do minimální. K tomu, abychom mohli na stroji provádět sousledné frézování, musí být konvenční neboli klasická

frézka přizpůsobena tak, že se vymezi vůle a předpětí mezi posunovým šroubem a maticí stolu. Pokud není tato podmínka splněna, může dojít k poškození nástroje a dokonce i stroje. Výhodou je lepší kvalita obrobce a vyšší trvanlivost nástrojů. [12]



Obr. 3.2.3 Nesousledné a sousledné frézování [12]

Důležitou roli hrají rovněž vlastnosti obráběného materiálu, především pak obrobitelnost. Lze ji definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracováván některou z metod obrábění. Většina materiálů obrobků, používaných pro obrábění reznými nástroji, jsou slitiny železa, hliníku, mědi a niklu. Mechanické vlastnosti a obrobitelnost slitin se od mechanických vlastností a obrobitelnosti základních kovů zásadně liší. Podobné výsledky chemické analýzy, avšak u vzájemně odlišných struktur, obvykle znamenají rozdílnou obrobitelnost materiálu obrobku. Mimo to určuje obrobitelnost rovněž kvalita materiálu a výrobní proces. Základní dělení obrobitelnosti materiálů je jako snadno obrobitelné, běžně a obtížně obrobitelné, avšak pro přesnější stanovení obrobitelnosti byly zavedeny třídy a skupiny. Třídy jsou značeny číslicemi od 1 do 20, přičemž nejhorší obrobitelnost má materiál s nejnižším číslem. Skupiny se značí písmeny, ke kterým jsou přiřazeny různé druhy materiálu, např. a – litiny, b – oceli atd. Před zahájením procesu obrábění by se měla posoudit a ověřit obrobitelnost materiálu, do jaké míry tento materiál připouští optimalizaci podmínek obrábění. Při posuzování je nutné se soustředit na podstatné vlastnosti vztažené k materiálu a rovněž na to, jak tyto vlastnosti na obrobitelnost působí. [12, 13]

Fyzikální a chemické vlastnosti prostředí, ve kterém probíhá řezný proces, mohou významně ovlivnit přesnost a strukturu povrchu obrobené plochy. Vhodným řezným prostředím lze obvykle zvýšit kvalitu obrobené plochy. Řezné prostředí vytváří nejčastěji kapaliny, procesní pasty, olejová mlha nebo plyn. Tato média jsou vyrobena a užívána tak, aby měla chladicí, mazací a čistící účinek. Správnou aplikací řezné kapaliny lze zvýšit řeznou rychlost, posuv i větší hloubku řezu. K dalším důležitým specifickým požadavkům, kladeným na řezná média, lze zařadit provozní stálost, ochranný účinek, zdravotní nezávadnost a přiměřené provozní náklady.

Chladicím účinkem se rozumí schopnost řezného média odvádět teplo z místa řezu. Odvod tepla vzniklého při řezání se uskutečňuje tím, že řezné médium obklopuje nástroj, třísky i obrobek a přejímá část vzniklého tepla. Důsledkem je snížení teploty řezání, což má příznivý vliv na opotřebení a trvanlivost nástroje i na jakost povrchové vrstvy obrobené plochy - nižší hodnoty zbytkových napětí.

Mazací účinek je umožněn tím, že médium vytváří na povrchu obrobku a nástroje vrstvu, která brání přímému styku kovových povrchů a snižuje tření, ke kterému dochází mezi nástrojem a obrobkem. Projevuje se pozitivně na velikosti sil řezání, spotřebě energie a také zlepšuje jakost obrobeného povrchu.

Čistící účinek řezného média spočívá zejména v odstraňování třísek z místa řezu. Hraje důležitou roli především při broušení (zlepšení řezivosti brousícího kotouče důsledku vyplavování zanesených pórů, zabránění slepování částic třísky a usnadnění jejich usazování), řezání závitů nebo vrtání hlubokých děr. [12, 13]

4. Vliv naklonění nástroje na přesnost povrchu

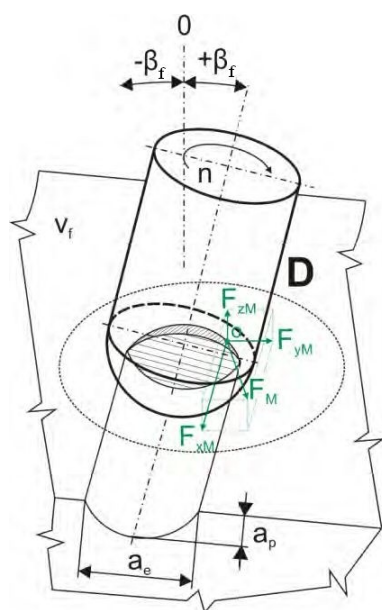
V následujících kapitolách je obsažena stěžejní část celé práce. Zaměříme se na nejdůležitější aspekty ovlivňující strukturu a přesnost obrobené plochy při frézování nakloněnou kulovou frézou. Rozebereme především úroveň sil řezání při náklonu nástroje a jejich vliv na strukturu povrchu. V poslední části této kapitoly pak zhodnotíme výsledky dosud provedených praktických experimentů, které jasně prokazují výhody této metody oproti frézování na tříosých obráběcích centrech bez využití cíleného náklonu frézy.

4.1 Síly řezání při náklonu nástroje

V odborné literatuře je k nalezení několik článků a prací, týkajících se modelování sil řezání u frézování kulovou frézou [14, 15, 16]. Mnohem méně jich však uvažuje a do modelu započítává i cílený náklon nástroje. V literatuře se často experimentální výsledky sil řezání pro procesy frézování kulovou frézou srovnávají s malou skupinou řezných podmínek, jedná se např. o otáčky vřetena, velikost posuvu, hloubka řezu atd. Hlavním důvodem je skutečnost, že experimentální testy vyžadují hodně času a jsou drahé. Mnoho experimentálních prací prezentuje výsledky pro různé hodnoty řezné rychlosti spojené s neměnnou rychlostí posuvu a jiné se zabývají účinky rychlosti posuvu a otáček vřetena. Pro naši práci se jeví jako nejvýhodnější vycházet z termomechanického modelu pro předpověď sil řezání při frézování nakloněnou kulovou frézou, jímž autoři jsou M. Fontaine, A. Moufki, A. Devillez a D. Dudzinski [17,18]. Nebudeme rozebírat složité matematické modelování sil řezání, ale zaměříme se pouze na výsledky provedených experimentů, které realizovali výše uvedení autoři. Tyto praktické testy rozebírají všechny důležité aspekty ovlivňující velikost jednotlivých složek sil řezání a tím i strukturu povrchu a přesnost. Dále budeme vycházet z výsledků experimentů hodnotících velikost sil řezání při různých úhlech sklonu nástroje. Tyto experimenty provedl Jan Dvořáček ve své diplomové práci na téma „Analýza silového zatížení frézovacího nástroje při pětiosém frézování.“ [23].

4.1.1 Složky sil řezání

Řezné nástroje s půlkruhovými čelními břity využívané pro obrábění různých druhů materiálů jsou zpravidla vyráběny se zuby ve šroubovici. V průběhu obrábění dochází k rotaci nástroje kolem osy otáčení a současně jeho posunu proti obrobku. Důsledkem tohoto sdruženého pohybu se v průběhu obrábění mění velikost i směr síly řezání. Dynamometr ovšem snímá velikosti silových složek v neměnných směrech kartézského souřadného systému, se složkami F_x , F_y a F_z , které jsou obvykle pro měření totožné s osami obráběcího stroje F_{xM} , F_{yM} a F_{zM} . Případnou transformací do souřadného systému definovaného dle ČSN ISO 3002 (viz. Obr. 4.1.1) je možné zjistit velikost silových složek F_c , F_{cN} a F_p , dle nichž je možné determinovat řezné výkony nástrojů, případně dimenzovat pohony vřeteníků. [23]

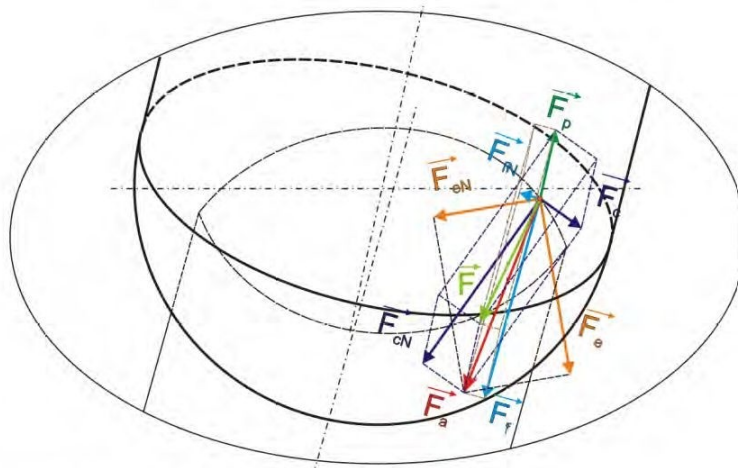


$\pm\beta_f$ - vyklonění nástroje/obrobku kolmo na směr posuvu

F_{xM} - osa (z) obráběcího stroje
 F_{yM} - osa (y) obráběcího stroje
 F_{zM} - osa (z) obráběcího stroje

Detail D

Rozklad sil dle ČSN ISO 3002



o – uvažovaný bod ostří

F_c – řezná síla

F_{cN} – normálová řezná síla

F_f – posuvová síla

F_{fN} – normálová posuvová síla

F_a – aktivní složka celkové síly F

F_p – pasivní složka celkové síly F

F_e – pracovní síla

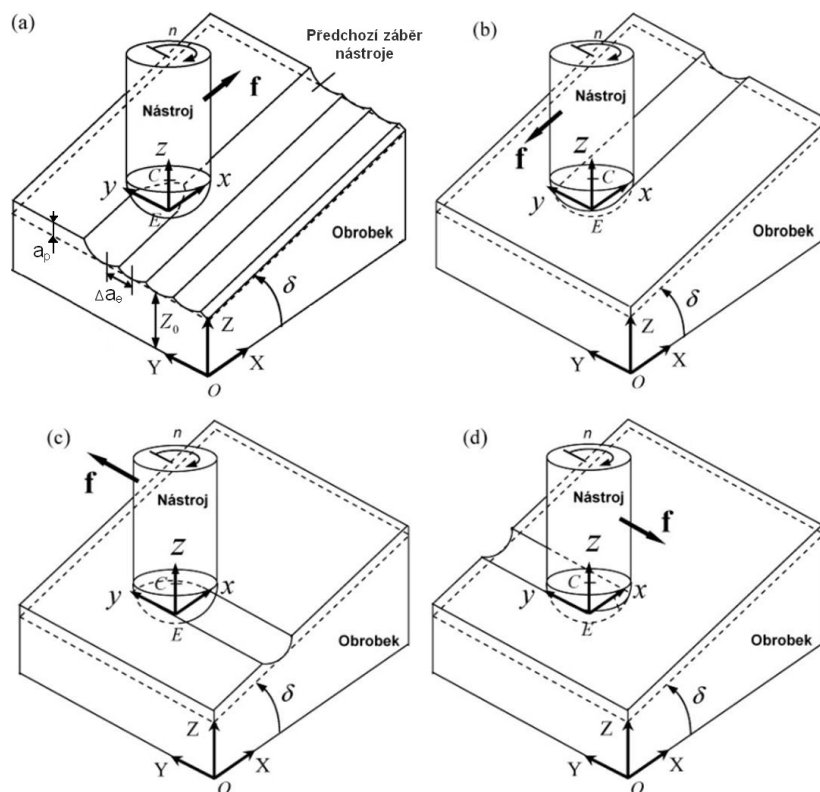
F_{eN} – normálová pracovní síla

F – celková síla

Obr. 4.1.1 Rozklad sil na kulové fréze s náklonem kolmým na směr posuvu [23]

4.1.2 Experimentální měření sil řezání při náklonu nástroje

V této kapitole budeme vycházet z výsledků experimentu [17, 18], jehož účelem bylo ověřit správnost navrhnutého modelu pro předpověď velikosti sil řezání. Autoři experimentu použili dvě základní strategie najíždění nástroje do materiálu. První strategie spočívá v naklopení ve směru posuvu – nástroj tažený (Obr. 4.1.2 a) a nástroj tlačný (Obr. 4.1.2 b). Druhá pak využívá náklonu nástroje ve směru kolmém na posuv – nástroj tažený (Obr. 4.1.2 c) a tlačný (Obr. 4.1.2 d). Obráběná plocha byla nakloněná rovina s ohledem na horizontální referenční rovinu (X, Y) kolem osy Y a úhel sklonu je označen δ .



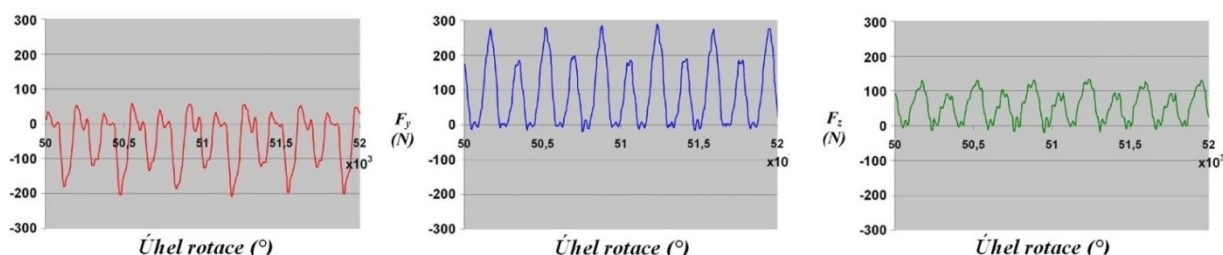
Obr. 4.1.2 Strategie frézování použité u experimentu [17, 18]

Testy byly provedeny na oceli 42CrMo4 (11 142) v suchých podmínkách na svislé tříosé CNC frézce. Pro měření složek sil řezání byl použit šestisložkový dynamometr Kistler, přičemž výstupní signály byly zaznamenány a uloženy na konzole PC Dewetron pomocí vícekanalového nábojového zesilovače Kistler. Signály byly vybrány ve středu obrobku a signály typu elektrické napětí - čas byly transformovány na signály síla - úhel rotace.

V experimentech byla použita dvoudrážková kulová fréza o průměru 12 mm s úhlem šroubovice 17° a úhlem sklonu 0° na části kulové hlavy. Otáčky vřetena a velikost posuvu byly stanoveny následovně: $n = 5000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0,05 \text{ mm/zub}$. Dynamometr Kistler byl upevněn v nakloněné poloze na stole stroje. Pro experiment bylo zvoleno pět hodnot úhlů sklonu: $\delta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ a 20° . Vzorek byl rovnoběžnostěn s výškou 20 mm, délkou a šířkou 50 mm. Hodnota hloubky řezu byla konstantní $a_p = 1,5 \text{ mm}$, interval šířky řezu $\Delta a_e = 15 \text{ mm}$.

Na obrázcích 4.1.3 - 4.1.6 jsou vidět naměřené hodnoty sil řezání, působících na nástroj pro všechny výše uvedené strategie frézování. Hodnoty úhlu sklonu δ byly použity 15° pro

náklon ve směru posuvu a 20° pro náklon ve směru kolmém na posuv. Vzhledem k výměně nástroje se parametry měřené úchylkoměrem (excentricita e a poziční úhel ψ_e) liší.

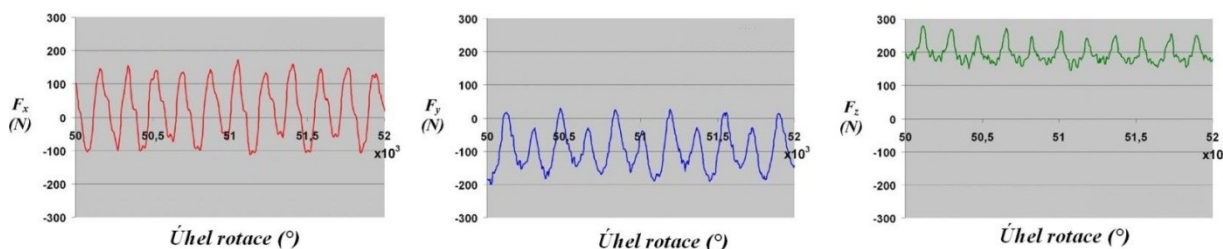


Obr. 4.1.3 Síly řezání - naklopení ve směru posuvu, nástroj tažený [18]

$$n = 5000 \text{ ot.min}^{-1}, f_z = 0,05 \text{ mm/zub}, \Delta a_e = 12 \text{ mm}, e = 0,01 \text{ mm}, \psi_e = 80^\circ, \delta = 15^\circ$$

Vliv řezných podmínek

Bylo zjištěno, že celková úroveň sil řezání klesá s rostoucí hodnotou řezné rychlosti v_c , přičemž vysoké hodnoty v_c mají tendenci stabilizovat řezný proces. Nejvyšší testované hodnoty posuvu $f_n = 0,2 \text{ mm/ot}$ mají tendenci omezovat efekt plastické deformace, ale mohou zvýšit deformaci a opotřebení nástroje, ty jsou totiž závislé na úrovni sil řezání. Zmenšující se interval šířky řezu Δa_e přirozeně snižuje hodnoty sil řezání, ale zaznamenané signály s malými hodnotami Δa_e (obrábění na čisto) jsou častěji nestabilní. Frézování taženým nástrojem ve směru kolmém na směr posuvu má tendenci stabilizovat řezný proces (jak lze vyčíst z naměřených hodnot sil řezání) a dosahuje lepší kvality obrobeneho povrchu a to zejména pro malé hodnoty intervalu šířky řezu Δa_e . Frézování tlačným nástrojem ve směru kolmém na posuv je účinnější, když má břit nástroje širší záběr, totéž platí pro vysoké hodnoty intervalu šířky řezu Δa_e , tedy při drážkování či hrubování.

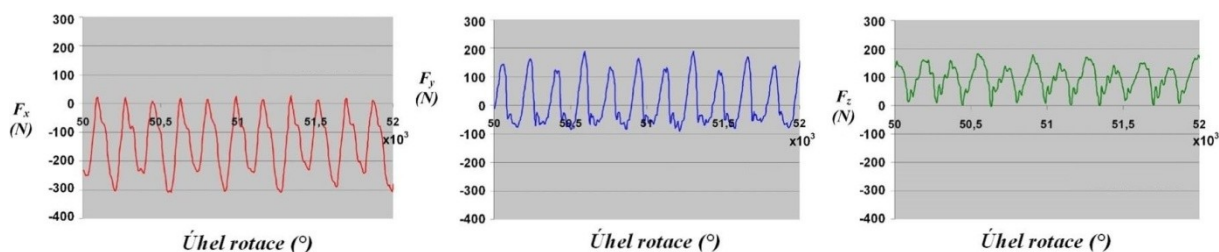


Obr. 4.1.4 Síly řezání - naklopení ve směru posuvu, nástroj tlačný [18]

$$n = 5000 \text{ ot.min}^{-1}, f_z = 0,05 \text{ mm/zub}, \Delta a_e = 12 \text{ mm}, e = 0,01 \text{ mm}, \psi_e = 80^\circ, \delta = 15^\circ$$

Házení nástroje

Při frézování může být házení způsobeno samotným nástrojem (opotřebení, asymetrie, nastavení vložky, dynamická nerovnováha či tepelná deformace), ale vyskytuje se především z důvodu vyrovnání osy rotace nástroje a rotační osou vřetena. Důsledkem toho je, že se nástroj otáčí kolem osy vřetena s excentricitou. Tato excentricita mění záběr nástroje a lokální řezné podmínky, zejména pak řeznou rychlost a úhly. Házení nástroje má tedy přímý vliv na úroveň sil řezání a vychýlení. Jeho míru ovlivňuje především kvalita konstrukce vřetena a upnutí nástroje. Nežádoucí vlivy házení se projevují zejména v případě, kdy nedeformovaná tloušťka třísky t_0 dosahuje malých hodnot a jedna nebo více řezných hran může být mimo záběr - nedochází k řezání.



Obr. 4.1.5 Síly řezání - naklonění ve směru kolmém na posuv, nástroj tažený [18]

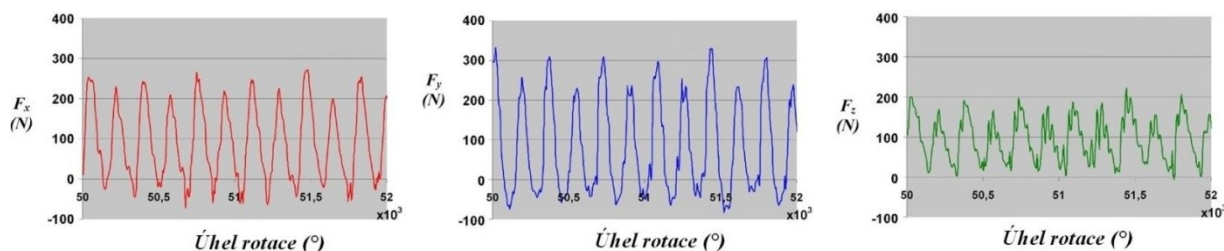
$$n = 5000 \text{ ot.min}^{-1}, f_z = 0,05 \text{ mm/zub}, \Delta a_e = 12 \text{ mm}, e = 0,008 \text{ mm}, \psi_e = 110^\circ, \delta = 20^\circ$$

Vliv plastické deformace

Materiálové toky, které se vyskytují v okolí řezné hrany, ovlivňují zejména složku síly řezání F_z . Materiálový tok a s ním související stříhání, které se vyskytuje na volné straně, přidává na velikosti plastické deformace. Intenzita plastické deformace má velký význam především v místě kolem břitu nástroje, kde řezná rychlost a nedeformovaná tloušťka třísky inklinují k nule. V tomto místě je hodnota výsledné deformační síly vysoká. Deformační síla je obvykle kolmá k povrchu nástroje a na břitu nástroje je její směr ve směru osy Z.

Ostrost řezné hrany ovlivňuje účinnost řezání a také plastickou deformaci. Opotřebení nástroje zvyšuje hlavní řeznou sílu a sílu deformační. U použité frézy měl úhel hřbetu a úhel sklonu nástroje malou hodnotu, tím byl vliv plastické deformace pravděpodobně zesílen. Pokud plastická deformace zvýší velikost sil řezání, ovlivní to také integritu povrchu (vzroste drsnost povrchu a zbytkové napětí) a zkrátí životnost nástroje. Tomuto jevu je třeba předejít.

Efekt plastické deformace může být omezen zvětšením sklonu mezi nástrojem a povrchem s cílem udržet břit nástroje mimo řeznou polohu.



Obr. 4.1.6 Síly řezání - naklopení ve směru kolmém na posuv, nástroj tlačný [18]

$$n = 5000 \text{ ot.min}^{-1}, f_z = 0,05 \text{ mm/zub}, \Delta a_e = 12 \text{ mm}, e = 0,008 \text{ mm}, \psi_e = 110^\circ, \delta = 20^\circ$$

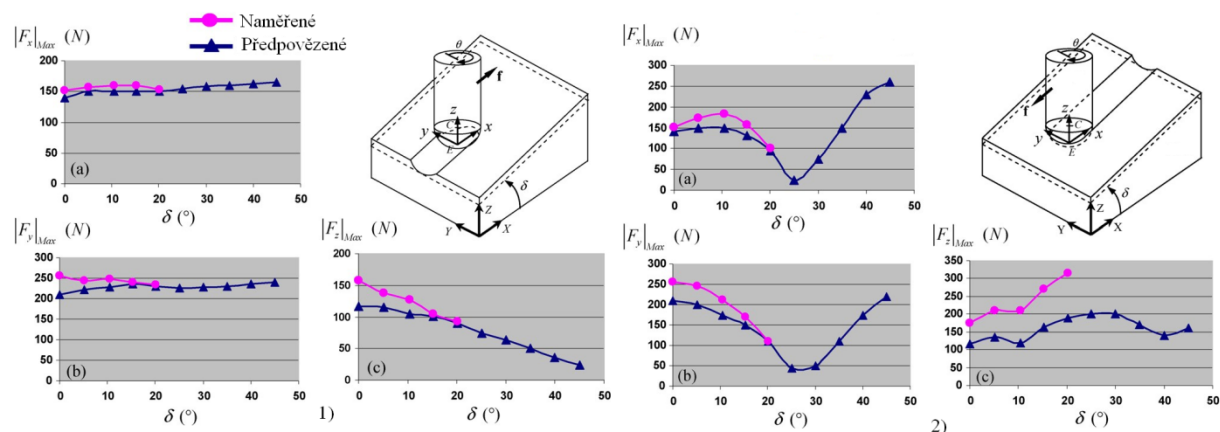
Vliv velikosti úhlu sklonu nástroje

Obr. 4.1.7 a 4.1.8 znázorňují tři složky síly F_x , F_y a F_z (experimentální a vypočtené) v závislosti na úhlu sklonu δ . V úvahu byly vzaty čtyři strategie frézování představené v předchozích kapitolách (Obr. 4.1.2). Naměřené hodnoty odpovídají průměrným hodnotám a při výpočtu nebylo bráno v úvahu házení nástroje. Cílem bylo určit nejvhodnější orientaci nástroje vzhledem k povrchu obrobku, aby se omezilo vychýlení, kmitání a zlomení nástroje. Sklon dynamometru v upínacím zařízení byl omezen, takže hodnoty byly naměřeny jen do velikosti úhlu sklonu $\delta = 20^\circ$, zatímco modelové hodnoty byly vypočteny až do $\delta = 45^\circ$.

Při frézování ve směru posuvu taženým nástrojem dosahují složky sil F_x a F_y nejmenších hodnot pro sklon okolo $\delta = 20^\circ$, složka F_z neustále klesá se zvyšujícím se sklonem. Vysoké hodnoty úhlu sklonu jsou tedy příznivé pro životnost nástroje, avšak vyšší hodnota úhlu sklonu nežli $\delta = 20^\circ$ by neměla být aplikována. Lze podotknout, že pro tuto hodnotu se na složce F_z snižuje vliv plastické deformace.

Při frézování tlačným nástrojem ve směru posuvu je kulové ostří nástroje vždy v poloze řezu a efekt plastické deformace pak působí na nástroj. Optimální úhel sklonu se vzhledem k vychýlení nástroje (malé hodnoty sil na osách X a Y) zdá být $\delta = 25^\circ$, ale pro životnost nástroje a integritu povrchu není příliš vhodný díky vysokým hodnotám složky síly F_z a velikosti deformační síly. Špatná kvalita povrchu byla pozorována při úhlech náklonu $\delta = 15^\circ$ a 20° . Malé hodnoty sklonu se zdají být vhodnější pro kontrolu síly řezání působící na osu Z.

Tyto výsledky potvrzují, že použití strategie frézování taženým nástrojem umožňuje lepší rozložení sil řezání na nástroji a omezuje efekt plastické deformace kolem břitů nástroje. Díky tomu jsme schopni dosáhnout zlepšené řezné stability a kvality povrchu. Bylo rovněž potvrzeno, že složka F_x , která odpovídá hlavnímu směru posuvu nástroje, je méně ovlivněna plastickou deformací.

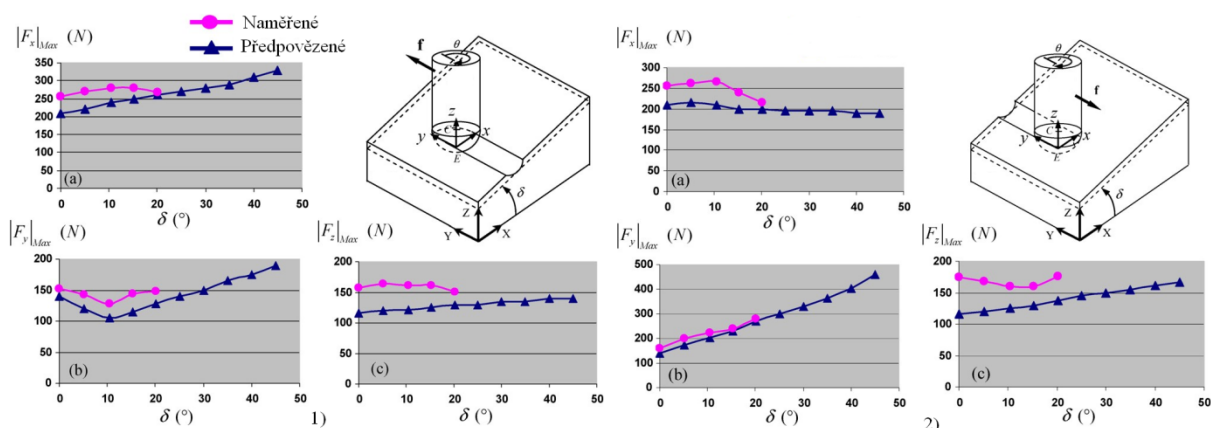


Obr. 4.1.7 Síly řezání v závislosti na úhlu náklonu - naklopení ve směru posuvu [18]

1) Nástroj tažený, 2) Nástroj tlačенý

Při frézování ve směru kolmém na posuv taženým nástrojem musí úhel sklonu při normální hloubce řezu $a_p = 1,5$ mm nabývat hodnoty až do 30° , aby se zabránilo použití špičky kulového ostří nástroje v řezání. Oproti frézování ve směru posuvu byl vliv plastické deformace zvýšen, ale její rozložení na třech osách je velmi podobné. Optimální úhel sklonu pro omezení vychýlení nástroje se zdá být mezi $0^\circ - 10^\circ$ a mezi $20^\circ - 30^\circ$ pro zmírnění jevů na řezné hraně.

Při použití tlačенého nástroje (Obr. 4.1.8-2) jsou křivky grafu podobné, ale maximální úroveň síly F_y je vyšší a síla F_x má tendenci klesat nepřetržitě. Zde se zdá, že úhel sklonu $\delta = 15^\circ$ je nejvhodnější vzhledem k úrovni sil řezání i efektu plastické deformace.



Obr. 4.1.8 Síly řezání v závislosti na úhlu náklonu - naklonění kolmé na posuv [18]

1) Nástroj tažený, 2) Nástroj tlačенý

4.2 Rozdíly v přesnosti mezi tříosým a pětiosým frézováním

Neexistuje mnoho odborných textů, které by se zabývaly praktickým porovnáním přesnosti obrobené tvarové plochy mezi tříosým frézováním bez využití náklonu nástroje a pětiosým frézováním s náklonem. Hlavní důvod je ten, že tyto praktické experimenty jsou finančně i technicky náročné. Jedním z mála dostupných textů na toto téma je diplomová práce „Porovnání přesnosti digitalizované tvarové plochy s původní plochou modelu“, jejímž autorem je Miroslav Kroupa [19]. V této práci se autor zabývá především metodami nasnímání obrobených ploch a jejich vyhodnocením. Část práce věnuje i porovnáním přesnosti obrobené plochy mezi tříosou a pětiosou technologií a proto budeme z jeho výsledků v této kapitole vycházet.

Samotné srovnání bylo realizováno nasnímáním (digitalizací) tvaru obrobené plochy u obou metod a jejich následném srovnání s původní plochou CAD modelu. Řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 4.2.2, přičemž pro naše účely je třeba věnovat pozornost pouze kulovým frézám, které byly použity pro obrábění tvarových ploch. Nejvhodnější část modelu pro porovnání rozdílu mezi tříosou a pětiosou technologií je „vlna“ připomínající tvar sinusoidy. Pro nasnímání byla použita dotyková metoda automatického snímání na obráběcích strojích, která vychází ze systémů firmy Renishaw. Použit byl dotykový hrot s poloměrem kuličky $r = 1,5$ mm. Zpracování naměřených dat bylo provedeno v softwaru Catia

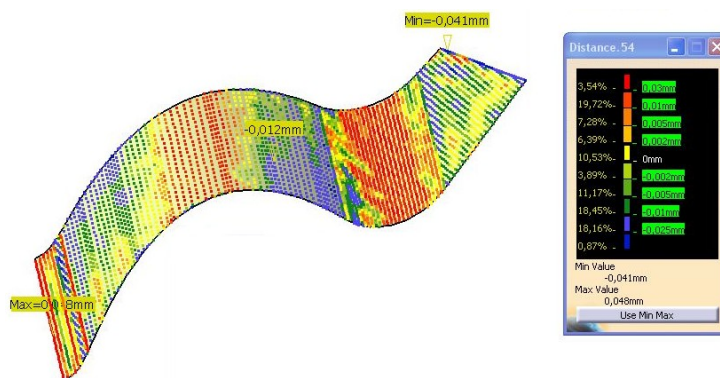
V5 R16. Po nasnímání povrchu vznikl „mrak bodů“ který byl podroben distanční analýze. Tato analýza porovná údaje o umístění bodu v prostoru s údaji z původního CAD modelu. Na obrázku 4.2.3 můžeme vidět příklad výsledku distanční analýzy – povrch „vlny“ je zbarven podle velikosti odchylek jednotlivých bodů. Kladné odchylky vyjadřují místa, kde byl oproti CAD modelu naměřen „přebývajíc materiál“, záporné pak „chybějící materiál“.

Tab. 4.2.2 Řezné podmínky pro pětiosé frézování testované plochy [19]

Úhel sklonu nástroje $\beta_f = 10^\circ$

Typ nástroje	Řezné podmínky – hrubovací operace				Řezné podmínky – dokončovací operace			
	ap [mm]	f [mm/min]	vc [m/min]	n [ot/mm]	ap [mm]	f [mm/min]	vc [m/min]	n [ot/mm]
Čelní válcová fréza Ø16 mm	2	1649	230	4580	0,5	1195	250	4980
Kulová fréza Ø12 mm	0,2	870	205	5440	—	—	—	—
Kulová fréza Ø6 mm	0,3	382	120	6370	0,3	372	140	7430
Drážkovací fréza Ø6 mm	0,3	764	120	6370	0,3	743	140	7430

Na základě distanční analýzy pro profil vlny obrobeneé **pětiosou technologií** bylo zjištěno, že přibližně 0,8 % odchylek leží mimo interval $\pm 0,05$ mm a maximální odchylky dosahují hodnot +0,076 mm a -0,087 mm. Po zjištění přibližných hodnot zbývajícího procenta odchylek byly upraveny rozsahy distanční analýzy. U zmíněných 0,8% odchylek se největší odchylky nacházejí v oblasti rádiusového náběhu povrchu vlny. Tyto nepřesnosti byly pravděpodobně způsobeny horší kvalitou obrobeneého povrchu.



Obr. 4.2.3 Distanční analýza pro profil „vlny“ [18]

Distanční analýza pro plochu obrobenou **třiosou technologií** zjistila, že mimo interval $\pm 0,05$ mm se nachází pouze 0,02 % měřených bodů a maximální odchylka dosahuje hodnoty -0,055 mm. [19]

Na základě rozložení odchylek v jednotlivých histogramech byly vytvořeny pomocné intervaly, ve kterých bylo vyčísleno procentuální zastoupení odchylek. Tyto intervaly jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4.2.3 Procentuální zastoupení odchylek v jednotlivých intervalech [19]

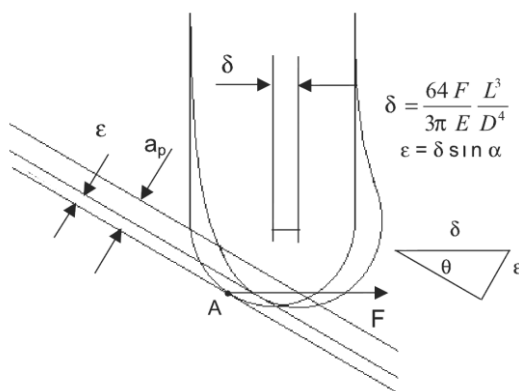
Intervaly [mm]	5-osá technologie	3-osá technologie
+0,005 až -0,005	40,84 %	29,77 %
+0,01 až -0,01	68,84 %	55,16 %
+0,025 až -0,025	95,35 %	91,57 %
+0,05 až -0,05	99,18 %	99,97 %
+0,075 až -0,075	99,95 %	100 %

Z tabulky je patrný rozdíl v přesnosti mezi těmito technologiemi. Procentuální zastoupení odchylek v intervalech $\pm 0,05$ mm a $\pm 0,075$ mm sice hovoří ve prospěch tříosé technologie, ale tyto údaje jsou zkresleny díky hodnotám maximálních odchylek u profilu povrchu, které vznikly při jeho obrobení. Naopak v menších intervalech jasně vítězí pětiosá technologie.

4.3 Změna přesnosti při měnícím se úhlu sklonu

V předchozí kapitole byla porovnána přesnost obrobeného povrchu při jednotném úhlu sklonu a za neměnicích se řezných podmínek. Abychom však získali lepší představu o tom, jak naklopení nástroje ovlivňuje přesnost povrchu, je třeba vzít v úvahu i výsledky jiných provedených experimentů. Autoři L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J.A. Sánchez, a M.A. Salgado měřili ve své práci „Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces“ [24] rozměrové odchylky od původní plochy modelu, přičemž využívali různé velikosti úhlu sklonu a také použili šest různých strategií frézování. V této kapitole tedy můžeme na základě těchto experimentů stanovit, za jakých podmínek lze při náklonu nástroje dosáhnout nejlepší rozměrové přesnosti obrobených tvarových ploch.

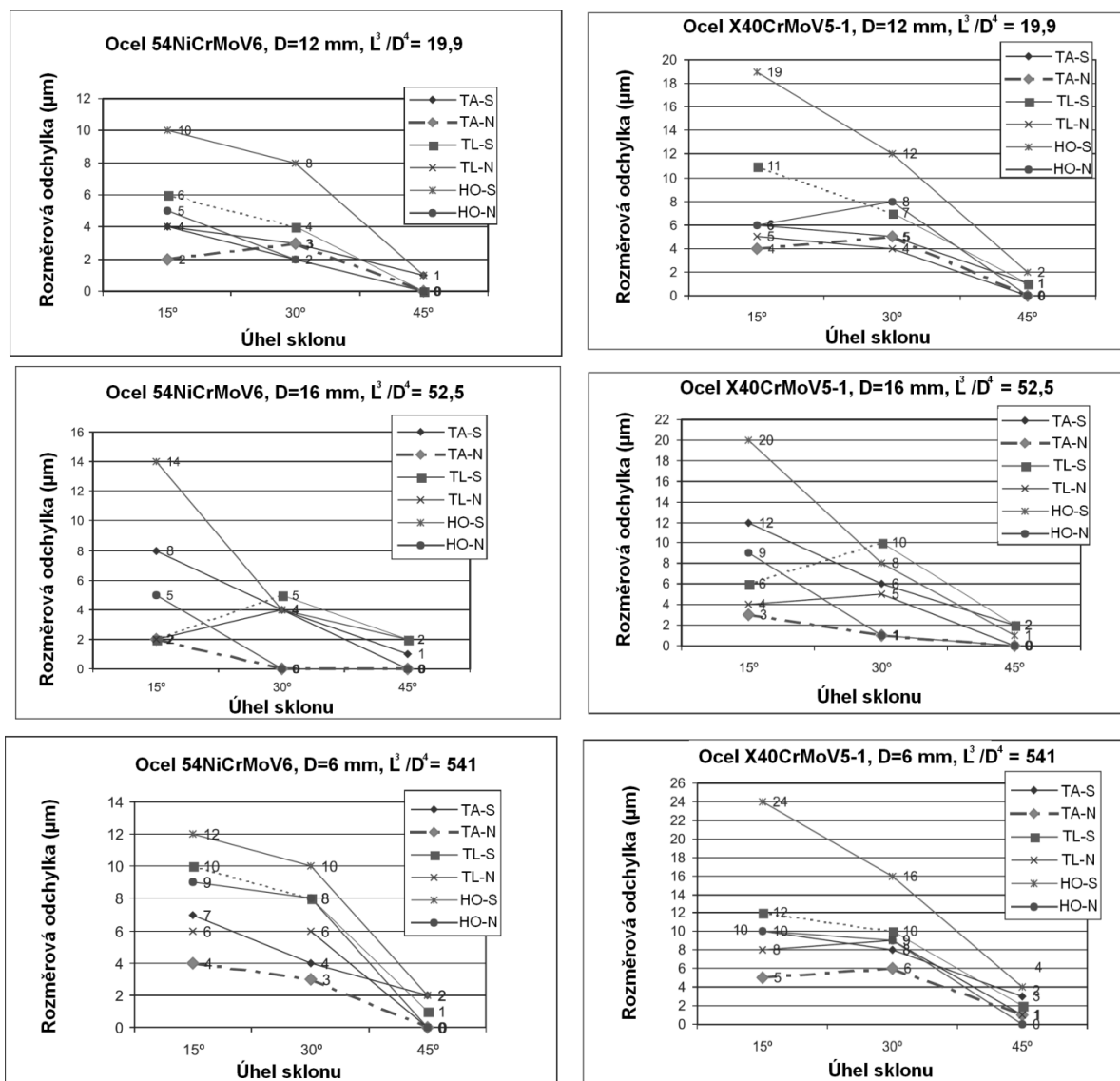
Pro testování byly použity vzorky vyrobené z nástrojových ocelí X40CrMoV5-1 a 54NiCrMoV6, které se uplatňují především při výrobě zápusťek či vstřikovacích forem. Byly uplatněny tři základní strategie tvarového frézování, přičemž u každé bylo testováno sousledné (-S) i nesousledné (-N) frézování. Jedná se o strategie frézování taženým nástrojem (TA), tlačným nástrojem (TL) a horizontální řádkování (HO). Použity byly nástroje o průměrech 6 mm, 12 mm a 16 mm od třech různých výrobců. Řezné podmínky byly následující: řezná rychlost $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (efektivní řezná rychlost se však mění s úhlem sklonu), hloubka řezu $a_p = 0,1$ až $0,2 \text{ mm}$ pro nástroj $\varnothing 6$ a $0,2$ až $0,3 \text{ mm}$ pro nástroje $\varnothing 12$ a $\varnothing 16$. Šířka řezu $a_e = 0,1$ pro nástroj $\varnothing 6$ a $0,2 \text{ mm}$ pro nástroje $\varnothing 12$ a $\varnothing 16$. Posuv na zub byl zvolen dle doporučení výrobce, tedy $f_z = 0,055 \text{ mm/zub}$ pro frézu $\varnothing 6$, $f_z = 0,077 \text{ mm/zub}$ pro frézu $\varnothing 12$ a $f_z = 0,089 \text{ mm/zub}$ pro frézu $\varnothing 16$. Obráběno bylo bez použití řezných kapalin. Velikost rozměrové odchyly ε závisí na velikosti úhlu sklonu a použité strategii frézování, jak je vidět na obrázku 4.3.1.



Obr. 4.3.1 Vztah mezi náklonem nástroje δ a rozměrovou odchylkou ε [24]

Na obrázku 4.3.2 můžeme vidět naměřené hodnoty rozměrové odchyly pro oba použité materiály a nástroje. Z výsledků je patrné, že odchyly od stanovené přesnosti byly větší při náklonu o úhel 15° , oproti úhlu 45° . Například u frézy $\varnothing 16 \text{ mm}$ byla největší odchylyka $20 \mu\text{m}$ pro úhel sklonu 15° , zatímco při sklonu 45° činila tato odchylyka pouhé $2 \mu\text{m}$. Tento výsledek byl srovnán s úrovní sil řezání a bylo zjištěno, že příčné síly řezání pro $\delta = 15^\circ$ jsou třikrát větší než-li je tomu u úhlu 45° . Tento fakt může být způsoben tím, že při náklonu o 15° je v kontaktu s materiálem delší část kulového ostří. Další příčinou by mohlo být snížení velikosti úhlu stoupání šroubovice. Dále z naměřených hodnot vyplývá, že lepší vliv na přesnost povrchu má nesousledné frézování. [24] Stejně jako v předchozích testech bylo

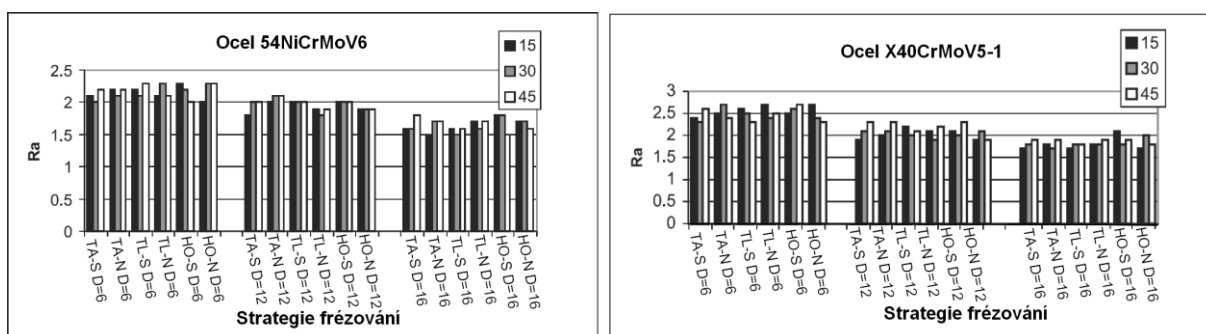
prokázáno, že z hlediska přesnosti obrobeneho povrchu je výhodnější použití strategie taženého nástroje, která zajišťuje menší rozměrové odchylky. Je však třeba dodat, že se rozhodně nejedná o pravidlo. V některých případech totiž bylo dosaženo velmi dobrých výsledků i při tlačném nástroji.



Obr. 4.3.2 Naměřené rozměrové odchylky ε v závislosti na úhlu sklonu [24]

Význam náklonu nástroje a stability řezného procesu značně ovlivňuje parametr štíhlosti L^3/D^4 . Například v případě nástroje o $\varnothing 6$ způsobují vibrace a rychlé opotřebení břitu nástroje zhoršenou drsnost povrchu. Tento fakt je třeba brát v úvahu a je nanejvýš vhodné, vyhnout se

použití těchto nástrojů u dokončovacích operací, kde je nutno dosáhnout lepší drsnosti povrchu. Pro informativní účely jsou zde uvedeny i výsledky naměřené drsnosti, (obr. 4.3.3) ze kterých můžeme vyčíst především tendenci klesající drsnosti s rostoucím průměrem nástroje. Strategie frézování jak se zdá nemá velký vliv na drsnost povrchu, ale lze pozorovat mírnou mírné zvýšení drsnosti s rostoucím úhlem sklonu. Lze předpokládat, že při vyhodnocení maximální výšky profilu nerovnosti R_z namísto R_a by byly naměřené rozdíly vyšší.



Obr. 4.3.3 Naměřená drsnost v závislosti na úhlu sklonu a strategii frézování [24]

4.4 Shrnutí získaných poznatků

V části práce, zabývající se úrovní sil řezání při náklonu nástroje, byly zjištěny následující poznatky:

- celková úroveň sil řezání má tendenci klesat s rostoucí řeznou rychlostí;
- síly řezání jsou proporcionálně ovlivněny rychlostí posuvu;
- použití taženého nástroje je výhodnější pro malé intervaly šířky řezu a pro menší hloubky záběru;
- použití tlačného nástroje se ukázalo jako lepší u některých zkoušek řádkování, zvláště pak když je kulová hlava nástroje v širším záběru.

Zhoršená kvalita povrchu a životnost nástroje byla pozorována u rostoucích hodnot radiální excentricity. Házení nástroje se zvyšuje také s rušivým kmitáním, které bylo pozorováno ze spektrální analýzy provedené na každém měřeném signálu. Změna úhlu sklonu potvrdila skutečnost, že vliv radiálního házení nástroje se zvyšuje s úhlem sklonu. Z těchto důvodů je nezbytné vzít v úvahu házení nástroje v každém modelu pro předpověď sil řezání a

tento standard musí být kontrolován a pokud možno vyloučen, aby byl sklon mezi nástrojem a povrchem správně použit jako parametr optimalizace. [18]

Bylo prokázáno, že největší intenzita plastické deformace působí hlavně na ose nástroje složky síly F_z . Plastická deformace ovlivňuje síly řezání, stabilitu řezání, opotřebení nástroje a integritu povrchu. Je tedy důležité, aby se tomuto jevu předešlo výběrem vhodného úhlu sklonu mezi nástrojem a povrchem.

Uvedené výsledky vyzdvihují fakt, že nejúčinnější strategií je frézování taženým nástrojem ve směru posuvu a to především díky lepšímu rozložení sil na řezných hranách. Kromě toho je špička kulového ostří mimo záběr a je tak zamezeno účinkům plastické deformace. Nejhorší strategií je frézování tlačným nástrojem ve směru posuvu a to kvůli plastické deformaci a nestabilitě. Strategie frézování ve směru kolmém na posuv jsou více závislé na optimalizačních kritériích. Některé referenční hodnoty pro optimální úhel sklonu β_f z hlediska velikosti sil řezání jsou navrženy v tabulce 4.4.1 pro každou testovanou strategii.

Tab. 4.4.1 Referenční hodnoty pro optimální úhel sklonu pro omezení nežádoucích jevů [18]

Frézovací strategie	Omezení max. sil řezání	Omezení vlivu plastické def.
Frézování taženým nástrojem ve směru posuvu	0° nebo 20°	15° - 20°
Frézování tlačným nástrojem ve směru posuvu	25°	0°
Frézování taženým nástrojem ve směru kolmém na posuv	0° nebo 10°	20° - 30°
Frézování tlačným nástrojem ve směru kolmém na posuv	0° nebo 15°	15° - 20°

V další části práce zaměřené na samotnou přesnost obrobeneho povrchu byly potvrzeny některé závěry z kapitol týkajících se sil řezání. Nejlepší přesnosti bylo dosaženo při použití strategie frézování taženým nástrojem a z naměřených výsledků jasně vyplývá, že přesnost povrchu rostla s úhlem sklonu. Výsledky jsou však dostupné pouze v intervalu od 15° do 45° a lze předpokládat, že s vyšší hodnotou náklonu by se přesnost povrchu zhoršovala, neboť nástroj by byl již v režimu obvodového frézování, které pro optimální kvalitu povrchu není ideální vzhledem ke geometrii kulové frézy. Nicméně u námi preferované strategie (tažený nástroj a nesousledné frézování) byly rozměrové odchylky mezi testovanými úhly sklonu (15°, 30° a 45°) mnohem menší, nežli tomu bylo v dalších testovaných strategiích. Vzhledem k rostoucí drsnosti povrchu se zvyšujícím se úhlem sklonu je tedy otázkou, zdali naklápět nástroj o úhel větší než 15-20°, když rozdíl v přesnosti je mnohdy méně než 2 μm .

5. Závěr

Cílem této práce bylo zhodnotit vliv náklonu nástroje na přesnost obrobených ploch. Vzhledem k finanční a technické náročnosti praktických experimentů bylo při zpracování tohoto tématu čerpáno především ze zahraniční odborné literatury, jež se náklonu kulové frézy věnuje. Pomocí praktických experimentů, které provedli pánové M. Fontaine, A. Moufki, A. Devillez a D. Dudzinski z univerzity de Metz, Francie [17, 18], byla stanovena úroveň sil řezání při náklonu nástroje pro čtyři základní strategie frézování kulovou frézou. Tyto získané hodnoty byly porovnány a mohli jsme tak snadno určit, u které strategie bylo dosaženo nejmenších hodnot sil řezání a tedy i nejlepší kvality povrchu. Kromě samotné velikosti sil řezání byl v úvahu brán i vliv plastické deformace, jenž je popsán v kapitole 4.1.2. I tento aspekt se negativně projevuje na kvalitě obrobené plochy a je nutno věnovat mu velkou pozornost. Bylo zjištěno, že plastická deformace se nejvíce projevuje při působení složky síly F_z a způsobuje zhoršenou stabilitu řezného procesu a výraznější opotřebení nástroje. Volba správného úhlu náklonu nástroje v kombinaci s vhodně zvolenou strategií může tyto nežádoucí vlivy minimalizovat. Některé hodnoty úhlu sklonu, jenž se z dostupných experimentů jeví jako ideální, jsou uvedeny v tabulce 4.3.1, shrnutí a doporučení jsou pak uvedeny v předcházející kapitole.

Samostatná kapitola byla věnována i porovnání přesnosti obrobené plochy při frézování s náklonem a bez (kapitola 4.2). Z tohoto srovnání vychází vítězně technologie pětiosého frézování s využitím náklonu nástroje. Výsledky mohly být ještě přesvědčivější, pokud by autor experimentů [19] použil strategii taženého nástroje a jiný úhel náklonu. Dále byly prozkoumány výsledky experimentů zaměřených na přesnost obrobené plochy při použití různých úhlu sklonu a v kombinaci s několika základními strategiemi tvarového frézování. Tyto experimenty provedli autoři L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J.A. Sánchez, a M.A. Salgado [24] z university Basque Country ESI. Výsledky jejich experiment jsou podrobeny rozboru v kapitolách 4.3 a 4.4.

Na závěr je třeba říci, že problematika přesnosti při frézování nakloněným nástrojem není ani zdaleka vyčerpané téma. Vzhledem k často protichůdným výsledkům ze všech experimentů, jenž byly v rámci této práce prozkoumány je jasné, že nelze provést obecné závěry a jasně říci, při jaké velikosti úhlu sklonu dosáhneme nejlepší přesnosti povrchu. Na výslednou přesnost má totiž vliv mnohem více faktorů. Mnohdy i použití nástroje od jiného

výrobce a s rozdílnou geometrií břitu způsobí výrazné odchylky od dříve naměřených hodnot jak přesnosti, tak sil řezání nebo drsnosti povrchu. Případné další praktické zkoušky, testující více hodnot úhlu sklonu s různými nástroji, by byly velmi rozsáhlé. Zvláště pak v případě, pokud bychom chtěli otestovat více druhů materiálů, nástrojů, úhlů sklonu a to vše s různými řeznými parametry. Jako efektivnější pro použití v praxi se jeví rychlé otestování na několika zkušebních vzorcích před výrobou samotné součásti. Tyto vzorky by byly ze stejného materiálu a při frézování by byly použity totožné nástroje a řezné parametry. Po kontrole přesnosti a drsnosti povrchu by technolog sám rozhodl, zdali jsou výsledky natolik lepší nežli u frézování bez náklonu, že má smysl pustit se do programování složitějšího obráběcího postupu zahrnující stálý úhel sklonu nástroje k povrchu obrobku. Snad i tato práce v budoucnu přispěje k podrobnějšímu zkoumání problematiky přesnosti frézování nakloněným nástrojem.

6. Použitá literatura

- [1] POSLUŠNÝ, P.: *Elektroerozivní obrábění*. MM Průmyslové spektrum, 7/2006, s. 37, ISSN 1212-2572
- [2] ŘASA, J., KEREČANINOVÁ Z.: *Nekonvenční metody obrábění*. MM Průmyslové spektrum, 10/2007, s. 58, ISSN 1212-2572
- [3] SKOPEČEK, T.: *Příspěvek k optimalizaci obrábění forem a zápusťek z tepelně zpracovaných nástrojových ocelí, "HSC - tvrdé frézování"*. 2005, 114 s., Diplomová práce na Západočeské univerzitě v Plzni
- [4] DOLEŽEL, O.: *Analýza technologie výroby tvarových ploch frézováním*. Brno: Vysoké ušení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 30s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.
- [5] SADÍLEK, M.: *Strategie frézování naklopeným nástrojem*. MM Průmyslové spektrum, 11/2005, s. 52, ISSN 1212-2572
- [6] SADÍLEK, M.: *Zvyšování jakosti povrchu naklopeným nástrojem při kopírovacím frézování*. Sborník přednášek mezinárodní konference při příležitosti 55. výročí založení Fakulty strojní – sekce 7, strojírenská technologie - obrábění. VŠB - TU Ostrava, 2005, s. 29, ISBN 80-248-0895-1
- [7] SADÍLEK, M.: *Strategie frézování naklopeným nástrojem – realizace experimentů*. MM Průmyslové spektrum, 5/2006, s. 28,29, ISSN 1212-2572
- [8] SADÍLEK, M.: *Zvýšení jakosti obrábění s využitím CAD/CAM systému*. Disertační práce. Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, VŠB – Technické univerzita Ostrava, 132 s., 23 příloh.

- [9] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 22 s.
- [10] POKORNÝ, P.: *Souřadnicové měřící stroje*. Skriptum TU v Liberci. Liberec 1999 ISBN 80-7083-326-2.
- [11] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie – část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X
- [12] BRYCHTA J., ČEP R., NOVÁKOVÁ J., PETŘKOVSKÁ L. *Technologie II. 2. díl - 1. vydání*, Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 142 s.: il. ISBN 978-80-248-1822-1
- [13] KUNZ, J.: *Technologické vlivy na parametry struktury povrchu obrobené plochy*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 45 s., 0 příloh. doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.
- [14] SUBRAHMANYAM, K.V.R., SAN, W.Y., SOON, H.G., SHENG H.: *Cutting force prediction for ball nose milling of inclined surface*. Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Int J Adv Manuf Technol (2010) 48, s. 23-32
- [15] FENG, H., SU, N.: *A Mechanistic Cutting Force Model for 3D Ball-end Milling*. Department of Mechanical and Materials Engineering, The University of Western Ontario. Journal of manufacturing Science and Engineering 2000.
- [16] CHAING, S., TSAI, CH., LEE, A.: *Analysis of cutting forces in ball-end milling*. Department of Mechanical Engineering, National Chiao Tung University, Journal of Materials Processing Technology 47/1995, s. 231 - 249.

- [17] FONTAINE, M., MOUFKI, A., DEVILLEZ, A., DUDZINSKI, D.: *Modelling of cutting forces in ball-end milling with tool–surface inclination. Part I. Predictive force model and experimental validation*. Journal of Materials Processing Technology 189/2007 73–84
- [18] FONTAINE, M., MOUFKI, A., DEVILLEZ, A., DUDZINSKI, D.: *Modelling of cutting forces in ball-end milling with tool–surface inclination. Part II. Influence of cutting conditions, run-out, ploughing and inclination angle*. Journal of Materials Processing Technology 189/2007 85–96
- [19] KROUPA, M.: *Porovnání přesnosti digitalizované tvarové plochy s původní plochou modelu*. Diplomová práce, Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 149 s., 5 s. příloh, vedoucí práce: Doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.
- [20] KULÍK, O.: *Aspekty obrábění tvarových ploch vykloněním nástroje*. Diplomová práce, Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 96 s., 155 s. příloh, vedoucí práce: Prof. Ing. Karel Janděčka, CSc.
- [21] JANDA, Z., FULEMOVÁ, J., ŘEHOŘ, J.: *Geometrická přesnost a řezné síly při tvarovém HSC frézování v závislosti na změně záběru*. Sborník přednášek vzdělávání, výzkum, inovace. FS, VŠB-TU Ostrava, Mezinárodní konference mladých výzkumníků a doktorandů. ERIN 2008. 69 s., 2008. ISBN 978-80-248-1982-2.
- [22] ČEP, R., HATALA, M., ORLOVSKÝ, I.: *Metody zkoušek obrobitelnosti materiálů*. Automobil Industry 3/2009, s. 52, ISSN 1802-5196
- [23] DVOŘÁČEK, J.: *Analýza silového zatížení frézovacího nástroje při pětiosém frézování*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 92 s., příloh 12, vedoucí práce: Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

- [24] LÓPEZ DE LACALLE, L.N., LAMIKIZ, A., SÁNCHEZ, J.A., SALGADO, M.A.: *Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces*. Department of Mechanical Engineering, University of the Basque Country ESI, Int J Adv Manuf Technol (2004) 24, s. 621-631